

## КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ПОТОКУ ПЛАЗМИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ ЗАСТОСУВАННЯМ ОБЕРТАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

*Создан комплекс оборудования для генерации струй низкотемпературной плазмы, который состоит из плазматрона, системы электромагнитов и системы управления пространственной конфигурацией магнитного поля. Исследовано влияние вращательного магнитного поля на дугу в плазматронах косвенного действия. Показана возможность оперативного изменения объема и распределения параметров потока плазмы путем управления пространственным положением дуги в дуговом канале плазматрона. Исследовано влияние параметров закрутки плазмообразующего газа на эффективность управления.*

*The complex of the units for generation low-temperature plasma stream is developed. The complex includes plazmatron and electromagnetic system for controlling space configuration of magnetic field. The influence of rotated magnetic field on the arc and the possibility of changing of value and the parameters of stream are shown. The influence of rotation parameters on the efficiency of controlling is researched.*

Розширення номенклатури матеріалів, що застосовуються у процесах напilenня, необхідність підвищення параметрів ефективності процесу нанесення та показників якості отриманих функціональних покриттів, потреба у зміні енергетичних параметрів та просторового положення плазмових струменів у процесах обробки поверхонь викликає необхідність вдосконалення існуючих і розробки нових способів керування основними енергетичними, просторовими та концентраційними параметрами потоків низькотемпературної плазми у процесах інженерії поверхні.

Перспективним напрямком у вирішенні цієї проблеми може бути застосування електромагнітних полів для впливу на струмонесучі ділянки плазмового потоку.

Методи магнітного керування якістю з'єднань достатньо широко застосовуються у зварюванні [1]. У процесах інженерії поверхні магнітні поля використовуються, в основному, для забезпечення функціонування генератора плазми, стабілізації його параметрів, впливу на процеси ерозійного спрацьовування електродів [2 - 3].

В останні роки на кафедрі Інженерії поверхні НТУУ «КПІ» почались і активно розвиваються дослідження, направлені на застосування електромагнітних полів для впливу на процеси формування плазмових і двофазних високотемпературних потоків у процесах інженерії поверхні з метою підвищення їх ефективності і якості отриманих продуктів [4 - 6].

Дослідження стосувалися, в основному, поперечних магнітних полів, накладання яких на струмонесучі ділянки плазми дозволяє переміщувати останні у просторі, змінюючи їх положення відносно об'єкта обробки та інтенсифікуючи при цьому процеси теплообміну [6 - 8].

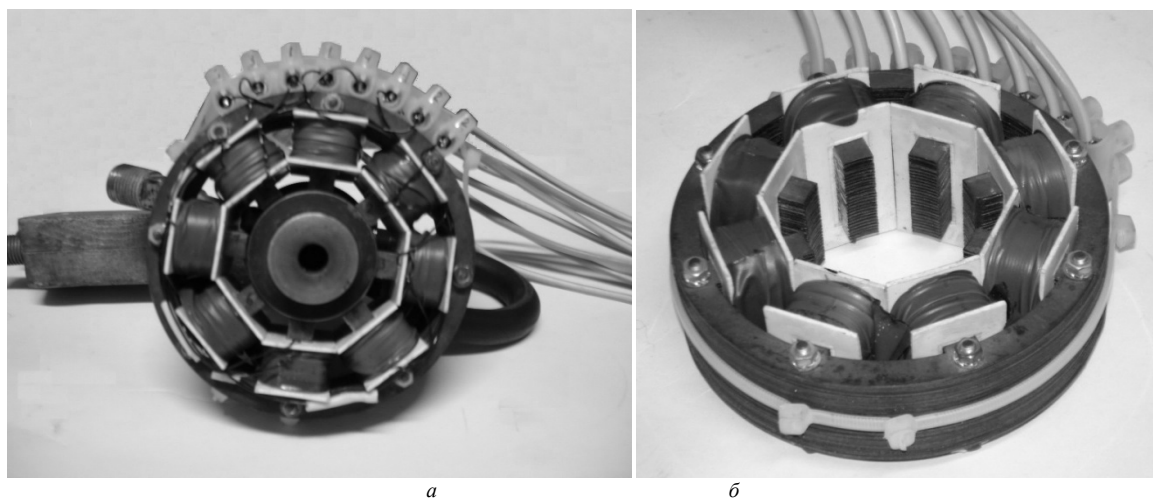


Рис. 1. Плазматрон із магнітною системою для створення обертального магнітного поля  
а – плазматрон і магнітна система у зборі; б – магнітна система

Перехід від поперечного магнітного поля до обертального в процесах нанесення покриттів дозволить одночасно, шляхом циклічного просторового переміщення із заданою частотою високотемпературної області газового потоку, як інтенсифікувати теплообмін дисперсної фази гетерогенного потоку з нагрітим газом, так і вирівняти температурний профіль зони взаємодії порошку і потоку газу, гармонізувавши тим самим умови взаємодії без застосування спеціального просторового узгодження окремих фаз гетерогенного потоку.

Метою роботи є дослідження особливостей взаємодії вихрових газових потоків із дугою, яка примусово переміщується в межах дугового каналу плазмотрона під дією обертального магнітного поля.

Для дослідження згаданих явищ створений плазмовий пристрій, побудований на принципі застосування обертального магнітного поля для впливу на просторове положення стовпа і приелектродної ділянки дуги в каналі плазмотрона. Пристрій складається із дугового генератора плазми (в конкретному випадку аксіального типу), магнітної системи, розміщеної на вихідному електроді генератора плазми та схеми керування електромагнітами (рис.1).

Для створення обертального магнітного поля застосована 8-и полюсна магнітна система, в якій із заданим темпом у певній послідовності вмикається пара протилежно розміщених обмоток електромагніта, що призводить до появи змінного у просторі напрямку індукції магнітного поля. Обмотки електромагніта розташовані на полюсах магнітопроводу, при цьому протилежні обмотки з'єднані між собою послідовно, що дає можливість створювати рівномірне магнітне поле в зазорі між полюсами.

Призначення схеми керування електромагнітами полягає у почерговій комутації обмоток магнітної системи для створення обертального магнітного поля, плавного регулювання частоти обертання магнітного поля та значення індукції в зазорі.

Система керування електромагнітом дозволяє змінювати швидкість та напрямок обертання поля, величину струму у котушці (значення магнітної індукції), напрямок магнітної індукції. Відповідно, блок керування магнітною системою має наступні режими роботи: пауза; обертання за годинниковою стрілкою; обертання проти годинникової стрілки; ручне перемикання полюсів.

Розподіл магнітної індукції в робочому зазорі між полюсами електромагніта попередньо вимірювався на спеціальному стенді, із використанням датчика Хола SS496 (діапазон вимірювання (0 – 65) мТл, похибка вимірювання – 1 %).

Досліджувався розподіл магнітної індукції для декількох характерних значень струму в обмотках електромагніта – 3 А, 6 А та 8 А.

Встановлена наявність деякого падіння значення індукції в центральній зоні зазору, порівняно зі значеннями біля полюсів, яке можна пояснити зниженням густини магнітних силових ліній у міру віддалення від полюса магніту і можливим шунтуванням частини силових ліній на сусідні, неробочі в даний момент часу полюси магнітопроводу.

Зі зменшенням струму в котушках електромагніту цей «провал» у значеннях індукції стає помітнішим і при зниженні струму менше 3 А практично всі силові лінії поля шунтуються на сусідні полюси магнітопроводу.

Візуалізація розподілу магнітного поля в зазорі між полюсами здійснювалась за допомогою залізних ошурок. Отримані зображення підтверджують наявність шунтування частини силових ліній на неробочі полюси магнітопроводу, хоча в зоні майбутньої взаємодії із дугою розподіл індукції досить рівномірний, а за абсолютними значеннями (в дослідженому діапазоні струмів в котушках електромагніту) рівень індукції достатній для ефективного впливу на дугу.

Картина розподілу повторюється із відповідним зміщенням при переході на наступну пару полюсів (рис.2), тобто вектор напрямку магнітної індукції ступінчасто обертається в зазорі між полюсами.

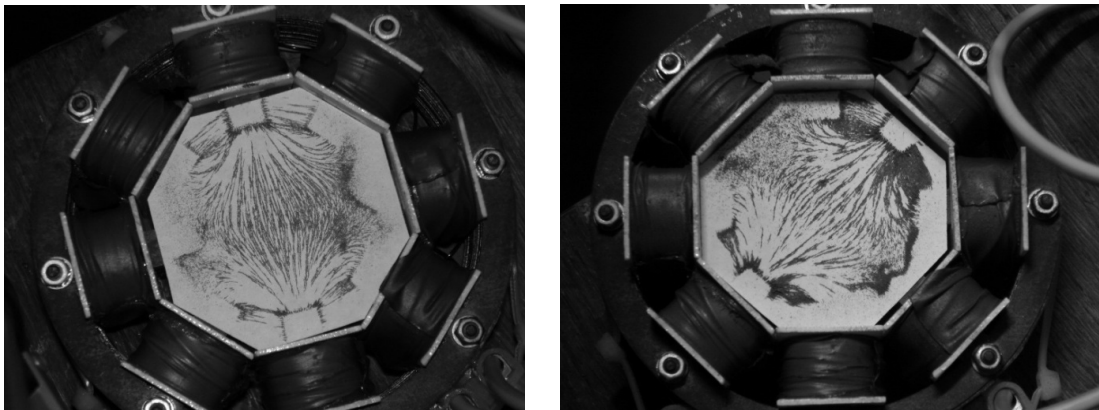


Рис. 2. Розподіл магнітного поля в робочому зазорі електромагніта при його обертанні шляхом послідовного вмикання пар полюсів

Перед запуском плазмового пристрою магнітна система нерухомо закріплюється на корпусній деталі вихідного електрода плазмотрона (анода) таким чином, щоб у зону дії магнітного поля потрапляла частина стовпа і приелектродна ділянка дуги.

Після запуску плазмового пристрою і виходу його на задані режимні параметри проводилось фотографування струменя низькотемпературної плазми за допомогою цифрової фотокамери „Sony DSC-W7” із автоматичним регулюванням яскравості. Зйомка проводилась в умовах дії зовнішнього обертального магнітного поля і при його відсутності, без зміни режимних параметрів горіння електричної дуги. Паралельно із фотозйомкою проводилась відеозйомка процесу генерації потоку плазми.

В процесі генерації плазми змінювались параметри керуючого магнітного поля, а саме – частота обертання та струм в обмотках магніту (значення магнітної індукції поля).

Дослідженнями встановлено, що при накладанні обертового магнітного поля починає змінюватись (збільшуватись при підвищенні частоти обертання поля) видимий об'єм високотемпературної зони плазмового струменя. Ця зміна може бути зафіксована в електронному виді у вигляді проекції об'ємного високотемпературного газового струменя на площину фотографування (рис.3).

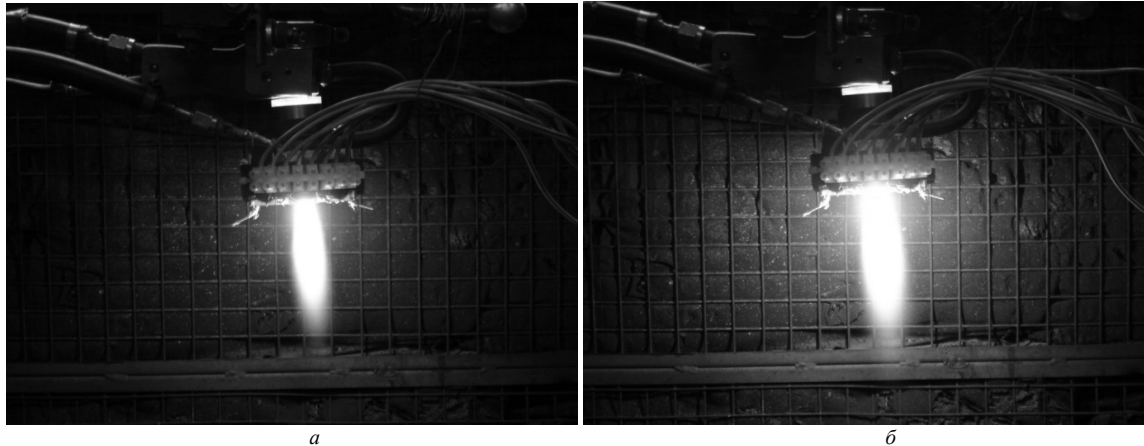


Рис. 3. Струмінь низькотемпературної плазми в умовах дії обертового магнітного поля  
а – за відсутності магнітного поля; б – при наявності зовнішнього магнітного поля

За початкову частоту приймалась така частота обертання поля, при якій візуально переставало спостерігатися коливання плазмового струменя. Тобто, встановлювався режим, за яким інерційність газодинамічних та теплових процесів в каналі плазмового розпилювача запобігала просторовому коливанню високотемпературного струменя, що, у загальному випадку, відслідковує відхилення електричної дуги під дією зовнішнього магнітного поля. На фотографіях фіксувалися усталені режими, які відповідають зміні об'єму та (або) яскравості плазмового струменя.

Обробка результатів досліджень (знімків просторового положення плазмового струменя за дії на нього обертового магнітного поля) проведена із застосуванням комп'ютерної програми обробки растрових графічних зображень. Застосоване програмне забезпечення дозволяє кількісно оцінити площу яскравого саява високотемпературного газового потоку на фотознімку шляхом використання математичних числових методів інтегрування значень кольорових растрових параметрів. Вхідними параметрами для такої операції служить маска кольорів, за допомогою якої програма за певним алгоритмом визначає границі яскравої плями.

Характерною особливістю досліджуваних процесів є залежність зміни об'єму високотемпературної зони плазмового струменя від взаємного напрямку обертання зовнішнього магнітного поля і початкового закручування плазموутворювального газу.

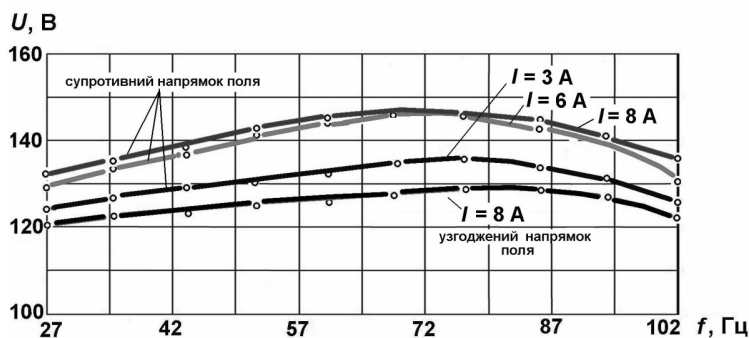


Рис. 4. Вплив частоти обертання зовнішнього магнітного поля на інтегральне значення напруги на дузі

сифікує теплообмін дуги із газом і призводить до підвищення значень локальної напруженості на окремих ділянках дуги. Однак, одночасне скорочення дуги нівелює цей ефект і загального суттєвого підвищення напруги на дузі не відбувається (рис.4).

У міру зростання частоти обертання поля, умови теплообміну дуги із потоком газу змінюються, бо змінюється відносна швидкість їх взаємного переміщення. На низьких частотах обертання поля (до 10 Гц), із підвищенням частоти відносна тангенціальна складова швидкості руху дуги і газу спочатку зменшується, а потім, із подальшим зростанням частоти обертання поля, повільно збільшується. У разі перевищення частоти обертання деякого порогового значення, поле починає стабілізувати дугу і намагатися повернути її у центральну зону дугового каналу. У результаті, умови теплообміну дуги із плазموутворювальним газом знову погіршуються і локальні значення напруженості на характерних ділянках дуги знижуються.

Встановлено, що за дії зовнішнього поля, напрямком обертання якого співпадає з напрямком початкового закручування газу, суттєвої видимої зміни об'єму високотемпературної області плазмового струменя не спостерігається в усьому дослідженому діапазоні зміни частоти обертання зовнішнього магнітного поля. Ширина області шунтування дуги на вихідному електроді за цих умов значно (у 2 – 3) рази скорочується і дещо переміщується вгору по потоку. Можна припустити, що переміщення дуги магнітним полем в область газового потоку із кількома складовими швидкості дещо інтен-

Наслідком згаданих процесів є певне, незначне, збільшення видимого об'єму високотемпературної зони зі зростанням частоти обертання поля із наступним уповільненням цього процесу. Позитивним моментом для плазових розпилювачів дисперсних матеріалів є вирівнювання температурного профілю потоку плазми при примусовому обертанні дуги в об'ємі дугового каналу, що сприяє гармонізації умов нагрівання дисперсного матеріалу у разі його наступного введення.

Зміна напрямку обертання поля на протилежний, за умови збереження напрямку початкового закручування плазмоутворювального газу, різко змінює умови теплообміну частини дуги із плазмоутворювальним газом. Навіть за можливого скорочення дуги в результаті її переміщення до бокової стінки дугового каналу і передчасного крупномасштабного шунтування, суттєво (на 15 – 20) % зростає інтегральне значення напруги на дузі за рахунок локального підвищення напруженості на частині стовпа і приелектродній ділянці дуги.

Підвищення інтегрального значення напруги на дузі призводить, за умови сталого струму дуги, до зростання загальної потужності дугового розряду і виділення більшої кількості енергії в одиниці об'єму плазмоутворювального газу. Це, у свою чергу, сприяє збільшенню об'єму високотемпературної області плазового струменя, яка інтенсивно випромінює (рис. 5). Додатковий позитивний ефект дає вирівнювання поля температур в межах потоку плазми, який генерується.

Аналізуючи залежність об'єму плазового струменя від частоти обертання зовнішнього поля і струму дуги в обмотках електромагніту, слід відмітити наявність пропорційного зростання цього об'єму із зростанням частоти обертання поля. При певному значенні частоти з'являється екстремум залежності об'єму високотемпературної зони струменя від частоти обертання зовнішнього поля, який переміщується на нижчі частоти із зменшенням струму в обмотках електромагніту. Уповільнення зростання і навіть деяке зниження об'єму є результатом дії кількох причин і, зокрема, потрапляння дуги у свій «гарячий» слід після досягнення певної швидкості переміщення в межах дугового каналу і суттєвого зниження за цих умов рівня теплообміну дуги із газом, який «набігає», а також зменшення радіуса прецесії дуги при відставанні швидкості її переміщення від швидкості поля із збільшенням частоти обертання останнього. До того ж, із збільшенням частоти перемикавання пар полюсів, зменшується ефективне значення струму в котушках електромагніту із зменшенням часу його протікання у кожній обмотці і зростає відносна тривалість перехідних процесів у обмотках, що підвищує повний опір кожної котушки за рахунок збільшення його індуктивної складової. У першу чергу, це проявляється за низьких початкових значень струму в обмотках електромагніту і призводить до послаблення ефекту взаємодії дуги із зовнішнім магнітним полем на більш низьких частотах обертання останнього.

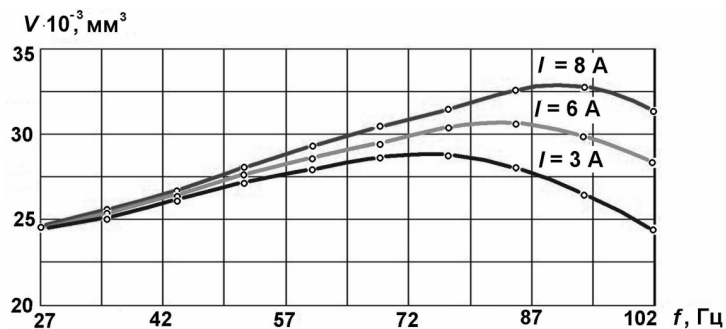


Рис. 5. Залежність об'єму струменя плазми від частоти обертання зовнішнього магнітного поля

## Висновки

1. Обертальне магнітне поле є ефективним інструментом впливу на геометричні та енергетичні характеристики потоків низькотемпературної плазми в процесах інженерії поверхні.
2. Ефективність впливу магнітного поля на параметри плазового потоку суттєво залежить від взаємного напрямку обертання зовнішнього магнітного поля і початкового закручування плазмоутворювального газу.
3. Існує певний діапазон частоти обертання поля, вихід за межі якого знижує ефективність керування параметрами потоку.
4. Використання обертального поля для керування параметрами плазового потоку потребує додаткових досліджень впливу на ці параметри інтенсивності закручування плазмоутворювального газу.

## Список літератури

1. Рижов Р. М., Кузнецов В. Д. Магнітне керування якістю зварних з'єднань. – К.: «Екотехнологія», 2010. – 288с.
2. Сергеев П. В., Локша Б. К., Шепель Г. А., Ибраев Ш. Ш. Магнитное управление электрическими дугами в высокотемпературных установках для нагрева газа // Тез. докл. V Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1972. – Т. I. – С. 131 – 132.
3. Майерс. Экспериментальное исследование электрической дуги, горящей в скрещенных аэродинамическом и магнитном полях // Ракетная техника и космонавтика. – 1967. – Т. 5, № 11. – С. 228 – 232.
4. Кузнецов В. Д., Пашенко В. М., Солодкий С. П. Проблемы эффективности защитных покрытий в инженерии поверхности машин та обладнання // Вестник национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ». – 2006. – № 49. – С. 178 – 186.
5. Кузнецов В. Д., Пашенко В. М. Магнітне керування в процесах інженерії поверхонь деталей машин і конструкцій // «Прогресивні технології і системи машинобудування»: Міжнародний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 34. – С. 177 – 183.
6. Спосіб керування просторовим положенням плазового потоку. Пашенко В. М., Кузнецов В. Д. / Патент на корисну модель № 34849, 26.08.2008. – Бюл. № 16.
7. Пашенко В. М., Солодкий С. П. Магнитное управление потоками низкотемпературной плазмы в процессах нанесения газотермических покрытий // Автоматическая сварка. – 2006. – №6 (638). – С. 53 – 55.
8. Пашенко В. М., Солодкий С. П. Підвищення ефективності процесу повітряно-плазового нанесення покриттів магнітним керуванням газопорошковим потоком // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – №3 (47). – С. 71 – 75.